

홀로그래픽 회절격자를 이용한 50GHz 채널간격의 42 채널 역다중화기

정희원 안 준 원*, 김 남*, 이 권 연**

42-channel demultiplexer with 50GHz channel spacing using holographic diffraction grating

Jun-Won An*, Nam Kim* and Kwon-Yeon Lee** *Regular Members*

요 약

우수한 광학적 특성과 저가의 소자 구성이 가능한 포토폴리머 부피형 회절격자를 이용하여 DWDM용 42 채널 역다중화기를 설계하고 광학적으로 입증하였다. 실험결과, 50GHz 채널간격에 대해 0.18nm의 3dB 대역폭과 ~20dB의 누화 억제, 1.6dB의 채널 균일도를 갖는 역다중화 특성을 보였다.

ABSTRACT

A 42 channel demultiplexer for dense wavelength division multiplexing(DWDM) using photopolymer volumetric diffraction grating that has excellent optical properties and low cost capability, has been designed and optically demonstrated. From the experimental results, we have obtained the 3dB bandwidth of 0.18nm, crosstalk suppression of ~20dB and channel uniformity of 1.6dB for a 50GHz channel spacing.

1. 서 론

최근 디지털 멀티미디어 기술의 급속한 발전과 인터넷의 대중화로 인해 이제는 비디오나 오디오 데이터와 같은 실시간 대용량 멀티미디어 정보 서비스에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있다.

이에 따라 대용량, 고속화의 필요성이 대두되었고 이를 충족시킬 수 있는 기술로 현재 고밀도 파장분할 다중화(DWDM: dense wavelength division multiplexing) 광통신 방식이 활발히 연구되고 있다.

이러한 DWDM 방식의 광전송을 위해서는 여러 개의 파장을 다중화하고 역다중화하기 위한 다채널 파장 다중화기(MUX: multiplexer) 및 역다중화기(DEMUX: demultiplexer)의 개발이 필수적으로 요구된다^[1-3]. 일반적으로 파장분할 다중화에 이용되는 MUX/DEMUX 로는 유전체 박막 필터(DTFF:

dielectric thin film filter), 광섬유 브래그 격자(FBG: fiber Bragg grating), 배열 도파로 격자(AWG: arrayed waveguide grating), 회절격자(diffraction grating)등을 이용한 방식들이 있다. 그러나 이러한 방식들의 경우 DWDM으로의 실용화를 위해서는 기본적으로 채널별 파장간격, 채널 수, 채널간 누화 특성, 편광 의존성 등과 같은 성능상의 개선이 크게 요구되고 있으며, 이에 따라 현재 DWDM의 요구조건을 만족하고 가격 경쟁력이 있는 소자를 개발하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 최근에는 광굴절 결정(photorefractive crystal)이나 포토폴리머(photopolymer) 등과 같은 매질에 형성된 위상형 부피격자를 이용하여 광통신용 필터나 DEMUX 등으로 적용하고자 하는 새로운 방식도 시도되고 있다^{[4][5]}.

본 논문에서는 홀로그래픽 기록매질 중 높은 회

* 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(jwahn@osp.chungbuk.ac.kr), ** 순천대학교 전자공학과

논문번호 : 020210-0502, 접수일자 : 2002년 5월 2일

※본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00324-0(2002))지원으로 수행되었음.

절효율, 안정성, 가격 등의 측면에서 매우 우수한 매질로 평가되고 있는 DuPont 사의 HRF-150-38 포토폴리머를 이용하여 DWDM 용 50GHz 채널간격의 42채널 홀로그래픽 역다중화기(H-DEMUX: holographic demultiplexer)를 제안하고, 이에 대한 이론적 분석 및 광학적 실험 결과를 제시한다.

II. H-DEMUX의 원리 및 구성

본 논문에서 이용한 H-DEMUX의 구조를 그림 1에 나타내었다. 광섬유를 통해 전송된 빔은 시준렌즈(collimating lens)와 개구면(aperture)을 통해 폭 D를 갖는 평행광으로 변형되어 입사각 θ_i 로 회절격자에 입사된다. 이때 격자로부터 회절된 서로 다른 파장의 신호들은 각기 서로 다른 회절 각도를 갖기 때문에 출력 집속렌즈(output-focusing lens)의 초점면(focal plane) Z에서는 각 파장별로 공간적인 스폿(spot)배열을 발생시켜, 서로 다른 파장을 갖는 각 채널들이 공간적으로 분리된다. 따라서 렌즈의 초점면 상에 원하는 채널간격을 만족하는 광섬유 어레이(fiber array)를 위치시키면, 각 광섬유는 서로 다른 파장을 수신하게되어 광통신용 DEMUX로의 적용이 가능해진다.

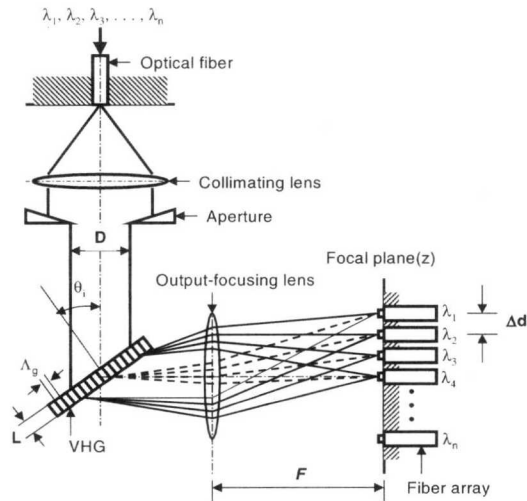


그림 1. H-DEMUX 구성도

그림 1의 구조에서 회절격자에 의해 선택되는 파장영역은 이용되는 격자의 파장선택성 $\Delta\lambda$ 에 의해 제한되며, 회절되는 빔은 입사각 θ_i 에 대해 브래그 조건을 만족하는 λ_c 를 중심으로 sinc 함수 형태의

세기 분포를 갖게된다. 일반적으로 회절격자의 파장선택성 $\Delta\lambda$ 는 Kogelnik의 결합 파동 방정식으로부터 다음과 같이 정의된다^[6].

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_R^2 \cos \theta_i}{2Ln \sin^2 \theta_i} \quad (1)$$

여기서 θ_i 는 판독빔(readout beam)의 입사각, n는 매질의 굴절률, L은 매질의 두께, λ_R 은 판독빔의 파장이다. 본 논문과 같은 구조의 경우 더 많은 채널을 수용하기 위해서는 더 넓고, 평탄한 파장선택성이 요구된다. 그리고 인접 스폿간의 공간거리 Δd 는 격자간격 Λ_g , 출력 집속렌즈의 초점거리 F, 인접채널간의 스펙트럼 간격 $\delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n-1}$ 에 의해 결정되며 다음과 같이 표시된다^[7].

$$\Delta d = \frac{\delta\lambda F}{\Lambda_g} \quad (2)$$

여기서 격자간격 $\Lambda_g = \lambda_w / 2 \sin \theta_w$ 이고, λ_w 는 기록빔의 파장, θ_w 는 두 기록빔간의 입사반각이다.

즉, 채널간격이 정해질 경우 렌즈의 초점거리가 길거나 격자간격이 좁을 경우 고정된 채널간격에 대해 요구되는 공간적 거리는 더욱 커지며, 이는 인접채널간 간섭 억제 능력이 향상됨을 의미한다. 그러나, 다중단일모드 광섬유의 코어를 포함한 클래딩의 직경은 일반적으로 약 $125 \mu\text{m}$ 이므로, Δd 는 $125 \mu\text{m}$ 를 만족해야 한다. 만약 채널간격 $\delta\lambda$ 를 0.4nm , 초점거리 F를 350mm , 격자간격 d를 $1.028 \mu\text{m}$ 이라고 가정 하면, 채널간 공간 거리는 식 (2)에 의해 $136 \mu\text{m}$ 가 되므로 이에 근접한 조건을 사용한다면 시스템 적용이 가능할 것으로 예측할 수 있다.

그림 2는 식 (2)를 이용해 렌즈의 초점거리와 기록각도의 변화에 따라 요구되는 인접 채널간 공간거리 Δd 를 계산한 것이다. 여기서 채널간격 $\delta\lambda$ 는 ITU-T에서 권고하는 $0.4\text{nm}(50\text{GHz})$ 을 적용하였고, 렌즈의 초점거리는 $250 \sim 450\text{mm}$ 범위에서 변화시켰다. 그림에서 보면 식 (2)에서 예측한 바와 같이 렌즈의 초점거리가 길어 질 수록 동일한 채널 분리를 위해 요구되는 공간적 채널간 거리가 증가하며, 격자 기록시 적용된 기록각 θ_w 가 클수록 격자 간격은 좁아지기 때문에 동일한 초점거리의 렌즈에 대해 요구되는 인접 채널간 공간 거리가 증가됨을 알 수 있다. 또한, 소자 구성시 사용되는 회절격자

의 파장 선택성은 격자 기록 조건에 의해 이미 결정되어있으므로, 동일 채널간격에서 Δd 가 넓어질수록 우수한 누화 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

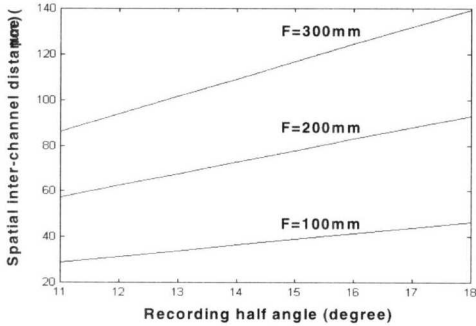


그림 2. 초점거리와 기록각도에 따른 인접 채널간 공간 거리

그림 1에 나타낸 구조에서 각 채널에 대한 3dB 대역폭 $\Delta\lambda_{BW}$ 는 격자로 입사되는 판독빔의 폭 D, 각 채널에서 검출되는 중심파장 λ_s , 판독빔의 입사각 θ_i 와 관련되며 다음과 같이 정의된다^[8].

$$\Delta\lambda_{BW} = \frac{\lambda_s^2}{2D \sin \theta_i} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 중심파장 및 입사각 θ_i 가 결정되면, 채널대역폭은 판독빔 폭 D에 의해 좌우됨을 예측할 수 있다. 즉, 격자로 입사되는 판독빔의 직경(diameter)이 클수록 협대역 특성을 갖는 소자 구성이 가능하며, D가 고정되었을 경우에는 중심파장이 작을수록 미세한 대역폭 감소 현상이 일어남을 예측할 수 있다. 그림 4는 $\lambda_w=532\text{nm}$, $\theta_w=15^\circ$ 일 때 중심파장과 판독빔의 직경에 따른 채널 대역폭을 계산한 것이다. 그림에서 보면 중심파장대역이

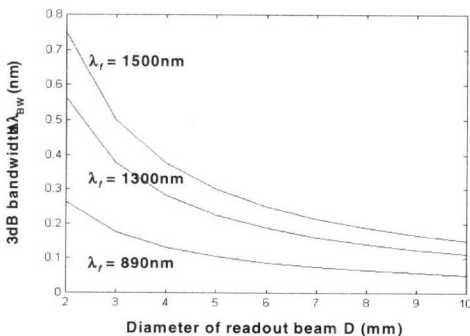


그림 3. 파장과 판독빔 직경에 따른 대역폭

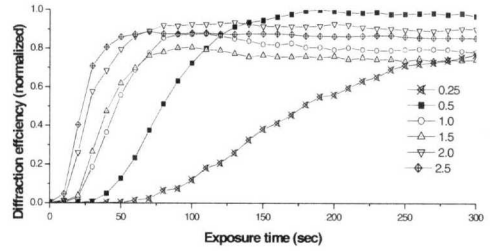


그림 4. 노출시간에 따른 포토폴리머의 회절효율

1500nm이고 $D=7.5\text{mm}$ 인 경우, 예측되는 채널 대역폭은 약 0.2nm로서 이 조건을 이용할 경우 0.4nm의 채널간격을 갖는 소자 구성이 가능할 것으로 예측된다.

III. 42채널 H-DEMUX 설계 및 실험

3.1 포토폴리머 회절격자의 특성

포토폴리머에서 위상형 회절격자의 생성은 결합체가 밀집된 영역과 폴리머가 밀집된 영역간의 굴절률 차에 기인하며, 굴절률 변화는 기록빔의 입사각 및 입사빔의 세기비에 가장 큰 영향을 받는다. 그림 4는 본 논문에서 이용한 DuPont 사의 HRF-150-38 매질의 노출시간에 대한 회절특성 실험결과를 나타낸 것이다. 격자기록을 위한 기록광원으로는 532nm의 파장을 갖는 Nd-YAG 레이저를 이용하였으며, 기록빔의 외부 입사반각은 15° 이다. 일반적인 회절격자의 굴절률 변조진폭 m 은 두 기록빔의 세기가 동일할 때 가장 우수하므로, 두 기록빔의 세기비는 1:1의 조건을 적용하였다. 노출이 끝난 후에는 120초의 확산시간지연(diffusion time delay)을 적용하였으며, 이후 100 mJ/cm^2 의 세기를 갖는 UV 광원에 노출시켜 정착과정을 수행하였다. 그리고 격자의 회절효율은 633nm의 He-Ne 레이저를 사용하여 측정하였다. 그림 4는 기록빔의 세기가 각각 0.25[mW/cm²], 0.5[mW/cm²], 1[mW/cm²], 1.5[mW/cm²], 2[mW/cm²], 2.5[mW/cm²]일 때, 300초의 노출시간에 대한 회절 특성을 나타낸 것으로, 매질에 입사되는 빛의 에너지에 따른 회절효율 상승 특성은 거의 동일하지만 본 실험에서 사용한 시료의 경우 기록빔이 $I_S=I_R=0.5 \text{ [mW/cm}^2]$ 의 세기일 때 가장 우수한 회절특성을 얻을 수 있었으며 이때의 노출 에너지는 약 200 mJ/cm^2 이다.

3.2. H-DEMUX 실험 및 결과 분석

본 절에서는 그림 1의 구조에서 렌즈의 초점거리 변화에 따른 인접 채널간 공간거리, 회절격자에 입사되는 판독빔의 직경에 따른 대역폭 변화, 채널간 균일도, 채널 누화 억제특성과 삽입손실을 광학적 실험을 통해 측정한다. 그리고 이러한 실험 결과를 바탕으로 DWDM용 42채널 H-DEMUX로의 적용 가능성을 증명한다.

그림 5는 포토폴리머 회절격자를 이용한 42채널 DEMUX의 실험 구성도이다. H-DEMUX 구현을 위한 홀로그래픽 회절격자는 그림 4에서 나타낸 바와 같이 $I_S=I_R=0.5[mW/cm^2]$ 의 입사빔 조건으로 기록하였으며 이때 회절격자의 효율은 약 90%이다. 그리고 역다중화 특성을 측정하기 위한 판독빔으로는 1520~1600nm대역을 갖는 광대역 광원(EDFA)을 사용하였고, 판독빔은 두 렌즈(PLCC, BICX)의 조합에 의해 평행광으로 변환된 후 빔의 직경을 제어할 수 있는 정밀 가변 개구면을 통해 격자에 입사된다. 이후 회절격자에 의해 회절되는 빔은 렌즈의 초점면에서 각 파장별로 배열하게되고, 렌즈의 초점면에 위치한 단일모드(SM : single mode) 광섬유를 통해 검출된다. 이때 검출되는 신호는 Anritsu사의 MS9710B 광 주파수 분석기(optical spectrum analyzer)를 이용해 분석하였으며, 공간적 이동에 따른 중심파장의 변화를 관찰하기 위해 출력단의 광섬유를 Newport사의 MFN-25cc XY 선형 스테이지에 고정하여 컴퓨터로 제어하였다.

그림 6은 채널간격이 0.4nm 일 때, 출력 집속렌즈의 초점거리에 따른 인접 스폿간의 공간거리를 측정한 실험값과 식 (2)를 이용해 계산한 이론값을

비교한 것이다. 여기서, 개구의 크기 D는 7.5mm, 판독각 θ_i 는 48.7. , 기록매질의 두께는 $38 \mu m$, 격자의 기록각은 15. 이고, 렌즈의 초점거리는 각각 300mm, 350mm, 375mm, 400mm이다. 실험결과 0.4nm의 파장 변화를 위해 요구되는 이동거리는 렌즈의 초점거리가 300mm일때 $114 \mu m$, 350mm일때 $138 \mu m$, 375mm일때 $147 \mu m$, 400mm일때 $153 \mu m$ 인 결과를 보였으며, 그림에서 보듯이 실험결과와 이론값과 거의 일치한다.

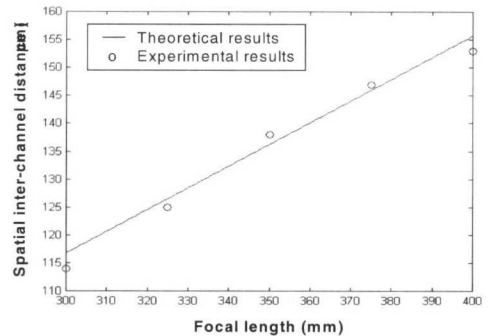


그림 6. 초점거리에 따른 인접채널간 공간거리

앞 절에서 예측한 바와 같이 초점거리가 길수록 동일한 채널 간격에 대한 공간적 이동 거리가 커지는 특성을 볼 수 있다. 이는 렌즈의 초점거리에 따른 공간 거리 의존성을 보여주는 결과로, DEMUX의 초점거리의 조정을 통해 수신단에 위치한 광섬유 어레이 배열에 맞는 소자 설계가 가능함을 나타낸다. 그러나 초점거리를 지나치게 크게 할 경우 DEMUX 전체 부피가 증가하는 문제가 있으므로 소자 크기와 채널간 거리를 적절히 고려하여야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구실에서는 광도파로(waveguide) 구조를 이용한 형태 및 홀로-렌즈(holo-lens)를 이용하여 렌즈에 의한 부피를 줄이는 방법도 연구하고 있다.

그림 7은 판독빔의 직경에 따른 채널 대역폭을 측정된 결과로, 격자의 기록각도가 15. , 초점거리가 350mm, 매질 두께가 $38 \mu m$, 판독각이 48.7. 일 때, 판독빔의 직경을 2.5mm~8.5mm 범위에서 1mm 간격으로 변화시키며 측정하였다. 측정결과 판독빔의 크기가 2.5mm일 경우 3dB 대역폭 $\Delta\lambda_{3dB}$ 는 0.68nm이고, 반면 판독빔의 크기가 8.5mm로 커질 경우에는 0.18nm의 값을 얻었다. 그림의 실험 결과는 식 (3)에서 예상한 것과 같이 판독빔의 직경이 작을수록 더 큰 대역폭을 갖는 소자 구성이 가

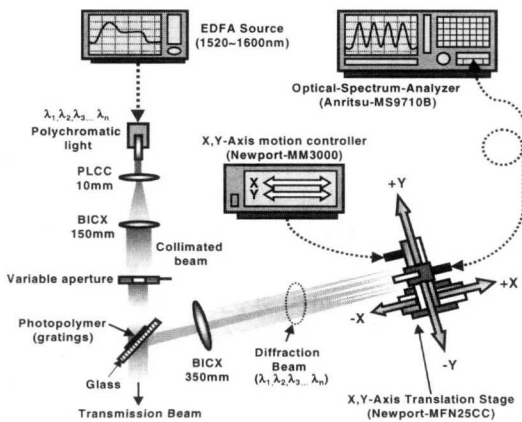


그림 5. 42채널 DEMUX를 위한 실험 구성도

능함을 나타내며, 판독빔 직경을 제어함으로써 채널 대역폭을 조정할 수 있음을 나타낸다.

그림 8은 42채널의 신호 분리 특성을 갖는 H-DEMUX의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 소자의 삽입손실을 측정하기 위해 그림 5의 구조에서 판독빔으로 파장 가변 레이저(wavelength tunable laser)를 이용해 회절효율을 측정한 데이터 값이다. 가변 레이저의 파장은 0.05nm 간격으로 1542.8nm에서 1545.1nm의 범위에서 변화되며, 이때 회절빔의 세기는 Newport사의 1835-C 디지털 파워미터로 측정하였다.

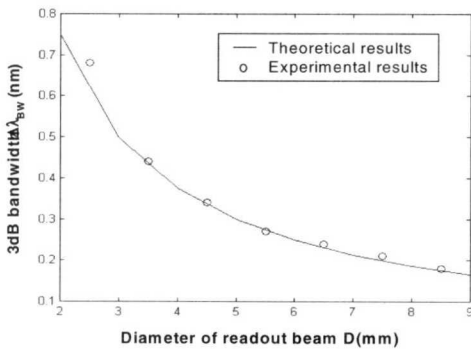
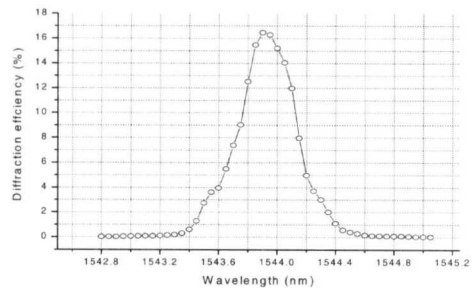


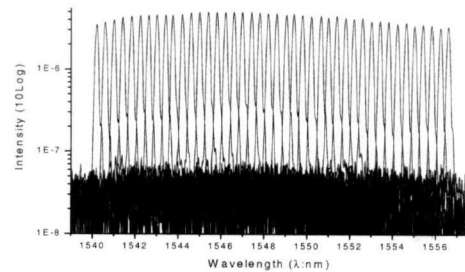
그림 7. 판독빔의 직경에 따른 대역폭

회절효율은 포토폴리머의 표면에서 반사되거나 흡수된 손실을 제외하고 투과된 빔의 세기를 I_T , 회절된 빔의 세기를 I_D 로 하였을 때, $I_D/(I_D+I_T)$ 로 정의하였다. 실험결과 각 채널의 회절효율은 16%(8 dB)로서 기존 역다중 필터인 AWG의 7 dB, FBG의 3.3 dB, 간섭필터의 4 dB 보다는 상대적으로 손실이 큰 것으로 나타났다. 이러한 손실의 일부는 소자 구성에 이용된 렌즈 및 회절격자 표면에서의 반사 및 흡수에 의한 손실로 예상되나, 주로 신호검출을 위해 사용한 SM 광섬유 코어 크기와 초점면에서의 스폿크기가 다르기 때문에 발생하였다(본 논문에서는 실험여건 상 광섬유와 스폿빔간의 효과적인 결합을 고려하지 않았다). 따라서, 각 소자들의 적절한 표면 코팅, 출력 집속렌즈와 광섬유 간의 개구수(numerical aperture) 일치 및 렌즈의 수차 등을 고려한다면, 우수한 삽입손실을 갖는 소자 구성이 가능할 것으로 생각된다. 그림 8(b)는 그림 5의 광학 장치에서 $D=7.5\text{mm}$, $L=38\ \mu\text{m}$, $\theta_i=48.7^\circ$, $F=350\text{mm}$ 의 조건을 통해 얻은 42채널 신호 분리 특성을 나타낸 것이다. 이용된 파장영역은 광대역 광원의 세기 분포 중 비교적 균일한 빔 세기를 갖

는 1540.2nm~1556.6nm 영역을 이용하였다. 실험 결과, 약 1.6 dB의 균일도를 갖는 42개 채널의 역다중화 특성을 얻을 수 있었으며, -20dB 정도의 채널간 누화 특성을 볼 수 있었다. 이는 현재 상용화되고 있는 AWG의 -30dB, 간섭필터의 -25 dB와 비교할 때 다소 낮은 값을 갖지만 채널간섭 특성 개선을 위한 아포다이징(apodizing) 기법등을 적용하거나, 렌즈의 초점거리 및 격자 간격 등과 같은 디자인 파라미터의 적절한 조절을 통해 인접 채널 간 분리 능력을 향상시킨다면 채널 누화 특성은 더 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 8. 파장 역다중화기 특성 실험 결과 (42채널)

IV. 결론

홀로그래픽 기록 매질중 화학적 처리과정 없이 저가격의 홀로그램 제작이 가능하고 높은 회절효율, 안정성 등과 같은 우수한 특성을 갖는 DuPont사의 HRF-150-38을 이용한 새로운 구조의 H-DEMUX를 제안하고, 42채널 역다중화 소자를 광학적으로 입증하였다.

역다중화 소자 구현을 위해 일정한 채널 간격에 대해 요구되는 공간적 거리, 채널 대역폭 제어요소 등을 분석하였으며, 광학 실험을 통해 비교·분석하였다. 실험 결과, 채널 대역폭은 렌즈의 초점거리

